Über die Verwendbarkeit von Films zu Messungen der relativen Feuchtigkeit.

.....

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Marburg

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Walter Oehmichen
aus Gera (Reuß j. L.)

Marburg 1913.

Angenommen von der philosophischen Fakultät zu Marburg, am 30. Mai 1913.

Berichterstatter: Herr Prof. Dr. Fr. Richarz.

1913.
Wuppertaler Aktien-Druckerei, Elberfeld.

Meinem lieben Onkel, Herrn Lehrer R. Witte, in dankbarer Verehrung gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556031_0081

Inhaltsverzeichnis.

A. Veranlassung zu der Arbeit . . . . . Seite 7
B. Schon bekannte ähnliche Instrumente . . . „ 7—11
C. Die Herrichtung des Materials . . . . . „ 11—14
D. Die Versuchsanordnung . . . . . „ 14—15
E. Die Untersuchungen und ihre Ergebnisse . . „ 15—33
1. Vorversuche über Empfindlichkeit usw. „ 15—19
2. Versuche mit Wärmestrahlung . . . . „ 19—25
3. Eichung . . . . . „ 25—30
a) Grenze des Meßbereichs . . . . . „ 25—26
b) Trägheit . . . . . „ 27—30
4. Uebersättigungsversuche . . . . . „ 30—33
a) Versuchsanordnung . . . . . „ 30—32
b) Versuche und Ergebnisse . . . . . „ 32—33
F. Zusammenfassung . . . . . „ 33—34
Fig. 1. Das Spiralhygrometer . . . . . „ 13
Fig. 2. Durchschnitt durch den Versuchsraum . „ 31
Tabellen I—VII über die Versuche . . . . . „ 35—41
Kurventafel, Kurven Nr. 1—22 . . . . . Anhang.

A. Veranlassung zu der Arbeit.

Vor einigen Jahren hatte Herr Dr. E. Hochheim im hiesigen Institut ein Spiralhygrometer aus photographischem Film hergestellt und qualitativ recht gute Resultate damit erhalten. Es war nun meine Aufgabe, dieses kleine Instrument systematisch auf seine Brauchbarkeit zu quantitativen Feuchtigkeitsmessungen zu prüfen, ferner auch zu untersuchen, ob es, wie das Haarhygrometer,[1]) Angaben von Feuchtigkeitsgraden über 100 % liefert.

B. Bereits bekannte Spiralhygrometer.

Hygroskope und Hygrometer aus spiralförmig gewundenen Körpern sind schon mehrfach benutzt worden. Bei A. und H. Wolpert[2]) finden wir eine Anzahl von derartigen Instrumenten beschrieben, die hier kurz angeführt werden mögen.

Nach dem Prinzip der Drehung gewundener einschichtiger hygroskopischer Körper funktioniert nach Wolperts Ansicht ein Hygroskop aus einem dünngeschabten, schraubenförmig geschnittenen Federkiel. Dieser ist oben an einem Gestell befestigt und unten mit einem Zeiger versehen, der sich auf einer Kreisbogenskala hinbewegt. Durch Aufnahme von Feuchtigkeit verlängern sich die Windungen, wodurch eine Drehung des Zeigers bewirkt wird.

Nach einem anderen Prinzip, dem der Krümmung bandförmiger Körper, die aus verschiedenen Schichten bestehen,[3]) sind die im folgenden beschriebenen, z. T. noch jetzt vielfach im Gebrauch befindlichen Hygro-

[1]) Adolf Fr. Weber, Inaug.-Diss. Marburg 1912, S. 29 ff.
[2]) Die Luft und die Methoden der Hygrometrie, Berlin, W. u. S. Loewenthal 1899, S. 325 ff.
[3]) Wolpert, l. c., S. 330 ff.

meter konstruiert. Bei diesen haben wir stets mehrere Schichten vor uns, die in verschiedenem Grade hygroskopisch sind, oder von denen eine gar nicht diese Eigenschaft hat, so daß der band- oder fadenförmige Körper beim **Ab**nehmen der Feuchtigkeit sich nach der Seite der mehr hygroskopischen Schicht krümmt, weil diese sich stärker zusammenzieht, dagegen bei **zu**nehmender Feuchtigkeit in entgegengesetzter Richtung wegen des Aufquellens dieser selben mehr hygroskopischen Schicht.

Nur der Vollständigkeit halber sollen hier von dieser Art die Apparate erwähnt werden, die aus den Grannen von Wildhafer, aus den gewundenen Spitzen der Fruchtknoten mancher Arten von Geranien, Pelargonien und anderer Pflanzen, oder aus Streifen von Vogelfedern hergestellt sind. Alle diese Instrumente sind mangelhaft, aber für weniger strenge Beobachtungen noch immer sehr beliebt.

Schon zuverlässiger ist das sog. Asthygrometer[4]), ein geschälter trockener Tannenzweig, der mit dem dickeren Ende an der Wand befestigt ist. Hier wird durch ungleiche Ausdehnung der verschiedenen Zellschichten eine Krümmung bewirkt. Hierbei ist offenbar vorausgesetzt, daß der Zweig von vornherein etwas gekrümmt und dadurch in seiner Zellenstruktur auf beiden Seiten verschieden beschaffen ist.

Ausführlicher beschrieben finden wir das „Strohfadenhygrometer" von Wolpert[5]), bei dem ein sehr schmaler, sorgfältig geschnittener Streifen von gut ausgetrocknetem alten Stroh als Hygrometerfaden dient.

Die folgenden Instrumente ähneln dem von mir benutzten, in Aussehen und Wirkungsweise schon mehr, sie seien deshalb näher beschrieben. Das Metallspiralhygroskop von Mithoff[6]), auch Eihaut-

[4]) Wolpert, S. 330 ff.
[5]) Wolpert, S. 340 ff.
[6]) Wolpert, l. c., S. 345 ff.

hygroskop genannt, besteht, wie sich aus diesen beiden so verschiedenen Bezeichnungen bereits erkennen läßt, aus einer Metallspirale, auf die ein besonders präparierter Streifen der Haut von Hühner- oder Gänseeiern aufgeklebt ist. Die feine Haut wird zu diesem Zwecke mittels Salzsäure von der harten Schale befreit, mit Seifenwasser, reinem Wasser und endlich Alkohol gewaschen, um sie zu entfetten, und schließlich mit einer Harzlösung auf der Metallspirale befestigt. Bei Veränderungen der Luftfeuchtigkeit ändert sich die Länge der Haut, und die Spirale rollt sich infolgedessen weiter auf oder zusammen. Diese Bewegung wird bei der ursprünglichen Herstellungsweise durch einen besonderen Mechanismus auf einen Zeiger übertragen, der eine Kreisskala durchläuft. Bei der neueren Konstruktion ist der Zeiger einfach am äußeren Ende der Spirale befestigt. In dieser Weise sind die käuflichen Taschen- und Zimmerhygrometer, wenn sie nicht Haarhygrometer sind, eingerichtet. Infolge des metallischen Bestandteiles hat die Temperatur begreiflicherweise einen großen Einfluß auf die Einstellung, und es sind umständliche Korrektionen notwendig, um für den jeweiligen Wärmegrad eine richtige Feuchtigkeitsbestimmung zu erhalten. Dieser störende Einfluß wird vermieden oder doch wesentlich verringert bei den folgenden Einrichtungen.

Das Hygrometer mit Schreibwerk von A. Nodon[7]) hat als wesentlichen Bestandteil einen schraubenförmig gewundenen Papierstreifen, dessen äußere Seite mit Gelatine überzogen ist, die man vorher durch einen Zusatz von Salicylsäure vor Zersetzung geschützt hat. Bei zunehmender Feuchtigkeit ziehen sich wegen der überwiegend hygroskopischen Natur der Gelatine die Windungen zusammen, bei abnehmender Feuchtigkeit dehnen sie sich aus. Ob das Instrument eine Grenze

[7]) Dinglers Journal, 1886, Bd. 262, S. 485 nach den Comptes rendus, 1886, Bd. 102, S. 1371.

seines Meßbereichs hat, ist nicht angegeben. Das Instrument hat eine hier nicht näher interessierende Registriervorrichtung. Zwischen 10° und 35° ist kein Einfluß der Temperatur auf die Angaben festgestellt. Ferner ist der Winkel, um den die gelatinierten Streifen sich drehen, als proportional der Zu- oder Abnahme der Feuchtigkeit gefunden.

Ein prinzipiell ähnliches, aber viel einfacheres Hygroskop hat G. M. Hopkins[8]) angegeben. Ein Streifen Kartenspan (1,25 cm breit und 16,5 cm lang) wird schraubenförmig um einen Bleistift gewickelt, außen angefeuchtet, festgebunden und getrocknet, dann außen zweimal mit Schellackfirnis bestrichen und nach längerem Trocknen abgenommen. Der Streifen behält nun seine Schraubenform bei, windet sich jedoch bei Aenderung der Luftfeuchtigkeit mehr auf oder zusammen. Er wird oben mit einem Korkstück an einem feststehenden Draht befestigt, am unteren Ende wird ein leichter Zeiger angebracht, der auf eine Kreisbogenskala weist. Diese Vorrichtung ähnelt ganz dem oben (S. 7) erwähnten Federkielhygroskop, die Drehung erfolgt aber dort durch Verlängerung und Verkürzung des gleichmäßig hygroskopischen Körpers, hier dagegen durch verschiedene Krümmung der ungleich hygroskopischen Schichten. In Wirklichkeit dürften entgegen Wolperts Ansicht auch bei dem Federkielhygroskop mehrere Schichten vorhanden sein, und selbst wenn dies nicht der Fall wäre, würde die innere Seite mehr gepreßt, die äußere mehr gedehnt sein, und dadurch ein Unterschied bedingt werden.

Ein weiteres einfaches Krümmungshygrometer[9]) besteht aus dünner Gelatinefolie (5 mm breit, 10—15 cm lang), einseitig mit einer dicken Schellacklösung über-

[8]) Zeitschr. f. prakt. Phys. 1893, Nr. 25, S. 274, nach Scientif. Amer.

[9]) Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht, Herausg. v. F. Poske, Berlin, Verlag v. Jul. Springer 1894, S. 90, nach Prometheus IV, 525, 1893.

zogen. Der Streifen wird an einer Nadel befestigt, die man senkrecht in eine Kartonscheibe steckt. Ein besonderer Zeiger ist an der Vorrichtung nicht angebracht.

Alle diese bisher beschriebenen Konstruktionen geben wertvolle Fingerzeige für die Behandlung des von mir zu untersuchenden Materials.

C. Das benutzte Material und seine Herrichtung.

Für meine Untersuchungen wählte ich den Kodakfilm der Eastman-Co, Rochester, der aus Celluloid mit dünner Bromsilbergelatineschicht auf einer Seite besteht, und zwar benutzte ich sowohl Plan- als Rollfilm mit gleichem Erfolge.

Ich stellte drei verschiedene Sorten von Versuchsmaterial her. Ein Teil des Films wurde etwa 2 Minuten dem gleichmäßigen Tageslicht ausgesetzt. Das bei der nun folgenden Behandlung mit Entwicklung noch unzersetzt gebliebene Bromsilber wurde im Fixierbade durch Natriumthiosulfat aufgelöst. Aus einem anderen, unbelichteten Teil des Films wurde alles Silbersalz durch Natriumthiosulfat entfernt. Beide Proben wurden dann sorgfältig in fließendem Wasser längere Zeit ausgewaschen. Ein drittes Stück endlich wurde nach längerem Aufweichen in Wasser gänzlich von jeder Gelatineschicht befreit. Durch die zuerst beschriebene Behandlung erschien der Film infolge gleichmäßiger Silberausscheidung schwarz, während bei dem zweiten nur eine durchsichtige Gelatineschicht auf der Grundsubstanz haftete, die dritte Sorte bestand nur noch aus dieser selbst, nämlich aus Celluloid.

Aus den sorgfältig an der Luft getrockneten Films aller drei Arten wurden nun diagonal über das Blatt laufende Streifen von verschiedener Breite (1,5 bis 3 mm) und Länge (10 bis 20 cm) geschnitten und mehrere Stunden in Alkohol entfettet. Die Streifen rollten sich noch zu wenig zusammen, um sofort für die Ver-

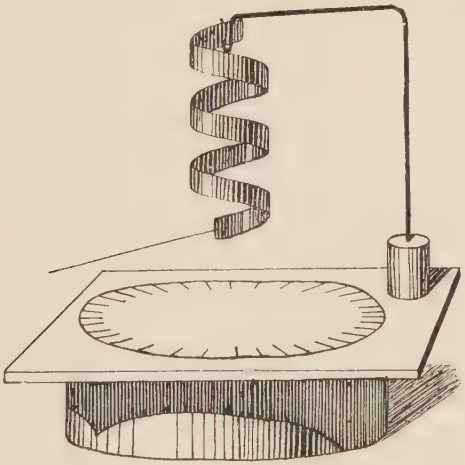
suche brauchbar zu sein. Deshalb wurde ähnlich wie bei Hopkins (siehe S. 10) verfahren. Die Streifen wurden noch in feuchtem Zustande schraubenförmig möglichst eng auf ein dünnes Glasröhrchen gewickelt, an beiden Enden festgeklebt und noch mehrmals angefeuchtet. Zu langes Verweilen in Alkohol sowie in Wasser machte die Gelatineschicht blasig und somit die Streifen unbrauchbar. Je dünner die Glasröhre war, auf die man aufwickelte, desto enger und gleichmäßiger wurden die Windungen, und desto besser später die Ausschläge.

Nach etwa einem Tage waren die Spiralen genügend getrocknet, um ihre Form beizubehalten und zur Untersuchung dienen zu können. Von den beiden erstbeschriebenen Sorten Film, die also eine Gelatineschicht mit oder ohne Silberausscheidung trugen, wickelte ich einige mit dieser Schicht nach innen, andere mit dieser nach außen auf, um einen etwaigen Unterschied in der Wirkungsweise feststellen zu können. Bei den oben (im zweiten Abschnitt) beschriebenen Instrumenten befand sich die stärker hygroskopische Schicht manchmal außen, manchmal innen. Prinzipiell ist das natürlich gleichgültig, aber praktisch haben sich große Unterschiede herausgestellt, wie weiter unten gezeigt werden wird. Bei den Films haben wir den Vorteil, daß wir die empfindlichere Schicht sowohl innen als außen anbringen können, während bei den oben erwähnten Hygroskopen wegen der Art der Herstellung ein Ueberzug nur außen möglich ist, ohne Rücksicht darauf, ob dieser die schwächer oder die stärker hygroskopische Schicht darstellt. Außerdem kann dieser Ueberzug niemals so gleichmäßig aufgetragen werden.

Die so hergerichteten Filmspiralen, die gewöhnlich einen Windungsdurchmesser von 0,4 cm und eine Höhe von 2,5 cm hatten, wurden nun mit einem leichten Zeiger versehen (s. u.) und am oberen Ende anfänglich

an metallische Achsen (Nadeln) angeklebt, die senkrecht auf einer kreisförmigen Papierskala steckten. Von dieser Befestigungsweise kam ich jedoch bald ab, da sich ja die Nadel wegen des angeklebten oberen Endes der Spirale nicht in der Mitte der Windungen befand. Deshalb stießen diese beim Auf- oder Zurollen leicht an die Nadel an und machten so genauere Ablesungen unmöglich. Ich klemmte daher später die Spiralen mit dem oberen Ende in zweckentsprechend gebogene, auf einem von der Skala unabhängigen paraffinierten Kork befestigte Drahtbügel (siehe Fig. 1) ein, sodaß sie sich frei bewegen konnten. So ließ sich die (gedachte) Achse der Spirale genau senkrecht über dem Mittelpunkte der in 360 Teile geteilten Kreisskala einstellen.

Fig. 1. **Das Filmspiralenhygrometer**



Die Spirale ist 2fach vergr. dargestellt.

Als Zeiger benutzte ich anfangs Borsten verschiedener Art; diese krümmten sich aber ebenfalls unter dem Einfluß der Feuchtigkeit und gaben so Anlaß zu Ungenauigkeiten. Ich nahm daher ganz dünne, aus einem Glasrohr gezogene Fäden, die ich schwarz

färbte, indem ich Tinte durch Kapillarwirkung in sie einsaugen ließ. Sie hoben sich von der weißen Skala dadurch besser ab, als die viel dickeren und schwerer färbbaren Borsten. Es konnte somit auch eine größere Genauigkeit der Ablesungen erzielt werden.

Ich mußte, da der Zeiger über einer horizontalen Skala spielte, senkrecht von oben ablesen. Dies und der Umstand, daß sich die Zeigerspitze über einen großen Bereich bewegte, würde die Benutzung eines Fernrohres oder Mikroskopes sehr schwierig gestaltet haben. Ich verzichtete daher ganz darauf, zumal da es sich herausstellte, daß die Ablesung mit bloßem Auge schon eine große Genauigkeit gewährleistete (s. u.). Zur Vermeidung von Parallaxefehlern war für die feineren Versuche die Skala, über deren Rand der etwa 5 cm lange Zeiger hinausragte, auf einen kleinen Glasspiegel aufgeklebt. Eine besondere Beleuchtung der Skala war im allgemeinen nicht notwendig.

D. Versuchsanordnung.

Als Versuchsraum benutzte ich ein zylindrisches Glasgefäß von etwa 26 cm Durchmesser, 28 cm Höhe und 0,4 cm Wandstärke. Es stand auf einer dicken Bodenplatte mit Holzuntersatz und hatte eine planparallele Deckplatte (0,9 cm dick), die ein Ablesen der Zeigerstellung von oben her gestattete (siehe Fig. 2, S. 31). Das Spiralhygrometer war infolge seiner Kleinheit hinreichend weit von den Wandungen entfernt, um deren etwa störenden Einfluß auszuschalten. Der Versuchsraum war einerseits an die Wasserstrahlpumpe angeschlossen, andererseits an eine Röhrenleitung, die sich nach der Vorrichtung zum Sättigen[10]) der eingesogenen Luft mit Wasserdampf und mit einem Rohr mit $CaCl_2$ gabelte. So konnte ich nacheinander ganz feuchte und ganz trockene Luft einleiten und damit jeden gewünschten Feuchtigkeitsgrad im Zylinder herstellen.

[10]) Adolf Fr. Weber, l. c., S. 20 ff. u. Fig. 1.

Als Vergleichsinstrument benutzte ich ein Koppesches Haarhygrometer, das aus seinem Gehäuse genommen und im Versuchsraum möglichst nahe den Filmhygrometern aufgestellt wurde. Seine Ablesung geschah mit hinreichender Genauigkeit tunlichst senkrecht durch die Zylinderfläche hindurch.

E. Die Untersuchungen und ihre Ergebnisse.

Meine Aufgabe war es, festzustellen

1. ob die Filmspiralenhygrometer genügend große, den Veränderungen der Feuchtigkeit proportionale Ausschläge liefern, und welche Bedingungen dafür zu erfüllen sind,
2. ob und in welchem Maße eine störende Reaktion auf Wärme, hauptsächlich Wärmestrahlen, vorhanden ist,
3. ob die Hygrometer möglicherweise eine untere oder eine obere Grenze ihres Meßbereichs besitzen.

Im Anschluß daran

4. ob sie zu Uebersättigungsversuchen[11]) geeignet sind.

1. Vorversuche.

Gleich die ersten, nur zur Orientierung dienenden Versuchsreihen zeigten, daß man die in Frage kommenden Instrumente sehr gut zu Messungen der Luftfeuchtigkeit brauchen kann.

Es wurde der S. 14 beschriebene und in Fig. 2 dargestellte Glaszylinder mit der Deckplatte einerseits und der Bodenplatte andererseits mittels Asphaltwachskitts dicht verkittet. Bei dem öfter nötig werdenden Abheben brauchte nur die letztgenannte Kittung gelöst und beim Aufsetzen wieder gedichtet zu werden.

[11]) Adolf Fr. Weber, l. c. (siehe Fußnote auf S. 7).

Nun ließ ich die Wasserstrahlpumpe Luft entweder durch die Sättigungsvorrichtung oder durch die Trockenröhre durchsaugen, so daß die Luft im Versuchsraume sich entsprechend mit Wasserdampf anreicherte oder davon befreit wurde.

Jede Minute wurde eine Ablesung gemacht, und der Stand von Haar- und Filmhygrometern notiert. Das Resultat dieser Versuche zeigt die Kurve 1, siehe Tafel, und Tabelle I am Schluß. Die Kurve weicht von einer geraden Linie kaum ab, nur am oberen Ende ist wohl infolge von Undichtigkeit des Versuchsraumes oder aus später (S. 30) zu betrachtenden Gründen eine geringe Störung zu erkennen.

Die Feuchtigkeitsgrade der Haarhygrometerskala sind als Abszissen, die Teilstriche auf der Kreisskala des Filmhygrometers als Ordinaten aufgetragen, und die Punkte, die zusammengehörige, d. h. zugleich beobachtete Werte bezeichnen, kontinuierlich verbunden.

Es zeigt sich, daß das Intervall von 28—48, also 20 % Feuchtigkeitsunterschied gleich ungefähr 22 Teilstrichen der Kreisskala war, von denen noch die Zehntel, ganz leicht aber halbe Grade geschätzt werden konnten.

Es ließen sich jedoch noch bis zu 5 mal empfindlichere Filmhygrometer herstellen, wie gezeigt werden wird.

Zunächst wurde nun festzustellen versucht, ob ein Unterschied in der Wirkungsweise zu bemerken sei, wenn sich die Gelatineschicht auf der Außen-, oder wenn sie sich auf der Innenseite der Windungen der Spiralen befand. Und zwar wurden sowohl „schwarze" Films, d. h. solche, die eine Gelatineschicht mit Silberausscheidung auf der Celluloidunterlage enthielten, als „weiße" Films, d. h. solche, die infolge der Entfernung des Bromsilbers im unbelichteten Zustande nur die durchsichtige Gelatineschicht trugen, untersucht.

Es ergab sich, daß eine schwarze Spirale mit Gelatineschicht a u ß e n auf ein Intervall von 40 % Feuchtigkeit einen Zeigerausschlag von etwa 35 Teilstrichen hatte; die mit Gelatineschicht i n n e n dagegen einen solchen von 100 Teilstrichen. Ein besonders empfindliches Instrument, das für die späteren Untersuchungen fast allein benutzt worden ist, ergab sogar 250 Teilstriche für denselben Feuchtigkeitsbereich. Befand sich die Gelatineschicht innen, dann erweiterten sich die Spiralwindungen, war sie außen, dann verengten sie sich bei zunehmender Feuchtigkeit. Die Gelatine ist eben hygroskopischer als das Celluloid. Bei den entsprechenden weißen Spiralen trat ungefähr derselbe Unterschied zutage. Dabei waren die beiden Streifenpaare je aus ein und demselben Filmstücke geschnitten und im übrigen ganz gleich behandelt worden. Aber schon bei der Abnahme vom Glasstabe zeigte sich ein Unterschied. Die Spiralen mit der Gelatineschicht außen hatten stets weitere Windungen, konnten also schon deshalb keine so guten Resultate liefern. Außerdem wurden sie nach kurzer Zeit gänzlich unbrauchbar, indem sie sich seitwärts streckten und ihre Spiralenform verloren. Diese Deformation war in der Folge geradezu das Erkennungsmittel dafür, ob richtig gewickelt worden war oder nicht.

Spiralen aus reiner käuflicher Gelatinefolie, die zum Vergleich hergestellt worden waren, zeigten dieselbe Erscheinung des Streckens und sogar die des Weichwerdens in feuchter Luft, so daß sie gänzlich ungeeignet zu irgendwelchen Messungen waren. Man sieht hieraus, daß die Gelatineschicht als mechanischer Stütze des Celluloids bedarf. Den gleichen Zweck der Festigung (außer dem der Verringerung der Hygroskopie auf der einen Seite) hat höchstwahrscheinlich auch bei dem auf S. 10 erwähnten Instrument der dicke Schellacküberzug. Auch bei dem Hygroskop von A.

Nodon (S. 9) dient ein Papierstreifen als Unterlage für die Gelatineschicht. Gleichzeitig wurden ferner noch Spiralen ohne jede Schicht, das heißt aus reinem Celluloid bestehend, den Versuchen unterworfen. Sie ergaben auf 70 % Feuchtigkeitsintervall 60—80 Teilstriche Ausschlag, und zwar in dem Sinne, daß der Windungsdurchmesser der Spiralen sich vergrößerte, wenn die Feuchtigkeit zunahm. Daraus ergibt sich, daß nicht nur die Gelatineschicht, sondern auch die Unterlagesubstanz der Films, das Celluloid, hygroskopisch ist.

Den Unterschied in der Größe der Ausschläge, wenn die Gelatineschicht innen oder wenn sie außen ist, können wir uns folgendermaßen erklären:

Diejenige Schicht, die innen liegt, ist durch das Aufwickeln auf den Glasstab (siehe S. 12) etwas zusammengepreßt, sie wird daher jetzt bei zunehmender Feuchtigkeit ein großes Bestreben haben, zu quellen und damit sich auszudehnen, am meisten selbstverständlich, wenn es Gelatine ist. Umgekehrt wird die Schicht, die außen ist, beim Aufwickeln schon etwas gedehnt, wird also nachher bei zunehmender Feuchtigkeit kein so großes Bestreben haben, zu quellen und sich zu strecken, am meisten immerhin aber noch, wenn es Gelatine ist. Stets bestimmt daher die Gelatine als die stärker hygroskopische Schicht den Richtungssinn des Ausschlages, und zwar so, daß die Windungen der Spirale sich bei abnehmender Feuchtigkeit nach ihr hin, bei zunehmender von ihr weg krümmen. Die Größe der Ausschläge kommt durch die Differenzwirkung der beiden verschieden hygroskopischen Stoffe zustande. Der Ueberschuß der Gelatinequellung über die Celluloidquellung wird am größten, wenn die Gelatine auch noch die für die Quellung günstigste Lage hat, nämlich sich innen befindet. In diesem Falle erhalten wir die großen Ausschläge (25 und mehr Teilstriche auf 10 % Feuchtigkeitsintervall). Ist dagegen

die Gelatineschicht außen, so liegt der ungünstigere Fall vor, und die Ausschläge sind nur klein (9 Teilstriche auf 10 % Feuchtigkeitsintervall).

Der Ausschlag der gänzlich schichtlosen Spiralen (9—11 Teilstriche auf 10 % Intervall) erklärt sich in Uebereinstimmung mit dem eben Gesagten dadurch, daß auch hier das Celluloid auf der Innenseite mehr zusammengepreßt, außen mehr gedehnt ist, also auch innen bei zunehmender Feuchtigkeit ein größeres Quellungsbestreben hat (vergl. auch S. 10).

Ein weiterer Beweis für die Hygroskopie des Celluloids war die Beobachtung, daß ein schmaler langer Filmstreifen, in ein Koppesches Haarhygrometergestell eingespannt und entsprechend belastet, ebenfalls auf Veränderungen der Feuchtigkeit reagiert, wenn auch nur etwa 5 mal so schwach als ein Haar. Sowohl mit als ohne Gelatineschicht fanden hierbei Längenveränderungen statt, die unmöglich wären, wenn das zugfestere Celluloid keine Hygroskopie zeigte.

Daß die durch Silberausscheidung schwarz gefärbten Films etwas größere Ausschläge ergaben, dürfte seinen Grund darin haben, daß bei ihnen die Gelatineschicht lückenloser ist, als bei denen, wo das Silbersalz herausgelöst worden war. Das Silber hat natürlich auf die Hygroskopie selbst keinen Einfluß.

2. Bestrahlungsversuche.

Bei den bisherigen Untersuchungen war auf die Temperatur nicht besonders achtgegeben worden. Da aber nach brieflichen Angaben von E. Hochheim ein Einfluß von Wärme, besonders Wärmestrahlen, vorhanden ist, so wurden nunmehr spezielle Versuche unternommen, um dies genauer festzustellen. Zu diesem Zwecke wurde der Versuchsraum mit Wasserdampf völlig gesättigt, außerdem durch reichlich darin vorhandenes Wasser dafür gesorgt, daß stets Sättigung erhalten blieb.

In einigen Fällen ging das Haarhygrometer während des Versuches etwas unter 100 % herab, dies störte jedoch nicht allzusehr. Die strahlende Wärme lieferten Gaslampen mit Auerglühstrumpf, die in wechselnder Anzahl und Entfernung von den Filmspiralen aufgestellt wurden. Ich untersuchte immer gleichzeitig vier bis fünf Spiralen, eine oder zwei „weiße", zwei „schwarze" und eine schichtlose.

Da die Wärmestrahlen durch Glas gingen, waren die langwelligen ausgeschlossen, es blieben aber immer noch genug wirksame Strahlen übrig.

Die Wirkung einer solchen Lampe aus allernächster Nähe, d. h. aus 20 cm Entfernung von den Hygrometern bei gleichbleibender Angabe des Haarhygrometers ist ersichtlich aus Tabelle II und III (am Schlusse S. 35 ff.) und den dazu gehörigen Kurven Nr. 2—8, s. Tafel, von denen 6 und 8 auch den Verlauf nach Aufhörung der Bestrahlung zeigen, der sehr charakteristisch ist. Temperatur in °C. ist hierbei auf der Abszissenachse, Ausschlag des Zeigers an der Spirale auf der Ordinatenachse abgetragen. Von der schichtlosen, mit untersuchten Spirale, E in Tabelle II—VII, ist hier und im Folgenden keine Kurve gezeichnet, da fast gar keine Wirkung der Wärmestrahlen bei ihr zu erkennen ist. Die Temperatur stieg hierbei im Versuchsraume von 18,6° bis auf 26,5° C., mit einem gewöhnlichen, vor direkter Bestrahlung geschützten Thermometer gemessen.

Zwei Gaslampen in derselben Entfernung (20 cm) ergaben die in Tabelle IV und Kurve 9—11 dargestellten großen Wirkungen. Die Temperatur nahm in 40 Minuten von 18,4° bis 26,5° C. zu.

Drei Lampen, aber aus 70 cm seitlicher Entfernung, wirkten, wie zu erwarten, schon weniger, wie Tabelle V und die Kurven 12—14 zeigen. Die Temperatur stieg innerhalb 70 Minuten von 17° bis 24,5° C.

Eine Glühlampe in 75 cm Entfernung brachte selbstverständlich nur noch geringen Einfluß hervor, Tabellen VI a und b, Kurven Nr. 15 und 16. In 146 Minuten erhöhte sich die Temperatur von 20° auf 23,5° C.

Eine Lampe endlich in 120 cm Entfernung schräg oberhalb des Versuchsraumes, wie sie zur Beleuchtung des Zimmers diente, steigerte die Temperatur während einer Stunde nur um 1° C. (von 22,5 auf 23,5), während der Zeiger der empfindlichsten Spirale nur um 5 Teilstriche zurückging, siehe Tabelle VII und Kurve 17.

Das Haarhygrometer war durch seine Aufstellung und durch die geringe Oberfläche des Haares gegen Bestrahlung geschützt.

Sehr interessant ist auch die Abhängigkeit der Ausschläge von der Dauer der Bestrahlung. Die eben beschriebenen Ergebnisse, die in den Kurven 6 und 8—11 in ihrer Beziehung zur Temperatur gezeigt sind, finden sich in den Kurven 6a, 8a—11a als abhängig von der Zeit dargestellt (die senkrecht gestrichelte Linie bedeutet das Aufhören der Bestrahlung.)

Das Anwachsen der Zeigerausschläge infolge der Bestrahlung bildet sich ähnlich einer Wendepunktkurve oder beinahe geraden Linie ab, während der Teil der Kurven, der jedesmal den Rückgang in die Anfangsstellung darstellt, einer Exponentialkurve gleicht, die sich asymtotisch der Nullinie nähert. Diese entspricht der Zeigerstellung vor Beginn der Bestrahlung. Man kann den Charakter der Kurve folgendermaßen beweisen: y sei in einer der Kurven 6a, 8a—11a der Abstand eines beliebigen Punktes von der Abszissenachse, auf der hier die Zeit abgetragen ist. Dann ist c—y sein Abstand von der Nullinie, die die Entfernung c von der t-Achse hat. Die Austrocknung des Films wird nun nach dem Aufhören der Bestrahlung um so schneller zurückgehen, je größer der

Feuchtigkeitsunterschied mit der Umgebung ist. Also der Abstand c—y wird am meisten abnehmen, wenn er am größten ist, oder sein Differentialquotient nach der Zeit wird proportional ihm selbst sein, also, wenn p ein Proportionalitätsfaktor ist,

$$-\frac{d(c-y)}{dt} = p.(c-y)$$

Die Proportionalität, die diese Differentialgleichung verlangt, kann man aber leicht durch Nachmessen an den Kurven bestätigen.

Man integriert nun die Differentialgleichung, indem man die eine Variable auf die linke, die andere auf die rechte Seite bringt,

$$\frac{d(c-y)}{c-y} = -p \cdot dt,$$

dann auf jeder Seite einzeln das Integral bildet und die erhaltenen Ausdrücke gleich setzt,

$$\ln (c-y) = -p \cdot t + C$$

Aus der Definition des ln erhält man dann

$$(c-y) = e^{-pt+C}$$

Hierin kann man endlich noch e^C als Faktor herausetzen und dafür P schreiben, es ist also

$$(c-y) = P \cdot e^{-pt}$$

Wir erhalten so eine Exponentialfunktion, deren Wert mit wachsendem t abnimmt.

Ferner wurden zum Vergleich Versuche unter Erwärmung des Zimmers, also ohne direkte Wärmestrahlung, gemacht. Es zeigte sich eine kaum merkliche Einwirkung, nämlich 2—10 Teilstriche Ausschlag, je nach der Empfindlichkeit der Spiralen, auf 5° Temperaturanstieg im Versuchsraum (innerhalb 1—2 Stunden). Erwärmung und Abkühlung wirkten hier ganz symmetrisch.

Die schichtlosen, also nur aus Celluloid bestehenden und daher ganz dünnen und durchsichtigen Spiralen zeigten bei den Bestrahlungsversuchen stets, auch bei größter Intensität, höchstens vier Teilstriche Ausschlag, sind also praktisch unempfindlich gegen Wärmestrahlen. Die Spiralen mit Gelatineschicht dagegen, und am meisten wieder die geschwärzten, geben die oben genannten Veränderungen der Zeigerstellung, und zwar immer im Sinne von abnehmender Feuchtigkeit. Die Windungen rollen sich weiter zusammen, sie werden also ausgetrocknet, jedoch nicht bis an die (S. 25 ff.) beschriebene untere Grenze.

Diese Austrocknungserscheinungen des Films bei gleich oder fast gleich bleibender Luftfeuchtigkeit können nur so erklärt werden, daß die Spiralen in Wirklichkeit eine höhere Temperatur besaßen, also auch weniger gesättigt waren, als die Luft im Versuchsraume. Daher sind auch die schwarzen Spiralen am empfindlichsten gegen Wärmestrahlen, da sie am stärksten Wärme absorbieren, und die schichtlosen, als die durchsichtigsten, nur ganz wenig. Außerdem sind diese durch das Fehlen der Gelatineschicht noch dünner und absorbieren schon deshalb weniger Wärme.

Die bloße Wirkung der Wärme ist jedenfalls viel geringer (siehe S. 22), die Wirkung der Austrocknung durch Bestrahlung überwiegt sie, ob sie nun im gleichen oder im entgegengesetzten Sinne erfolgt.

Die Anfangsstellung des Zeigers wird nach einiger Zeit stets wieder erreicht, wie sich auch aus Tabelle III—V erkennen läßt. Daß diese Stellung, die ja der Sättigung entspricht, für jede Spirale fest bestimmt ist, ersieht man aus den ersten Horizontalreihen der Tabellen III—VII; geringe Abweichungen verschwinden gegenüber den sonstigen großen Ausschlägen. Daß Tabelle II damit nicht übereinstimmt, kann an Skalenverschiebungen liegen oder auch daran, daß sich bei diesen ersten Versuchen noch kein vollständiger

Gleichgewichtszustand herausgestellt hatte, da ja z. T. neues, vorher trockenes Material verwandt wurde.

In der Folge wurden nun meist nur noch Instrumente aus geschwärztem Film benutzt, da sie große, besonders aber gleichmäßige Ausschläge zeigen, denen gegenüber die Wirkungen der Wärme vernachlässigt werden können, für die sie allerdings auch am empfindlichsten sind, die aber durch geeignete Vorsichtsmaßregeln vermieden werden können. Derartig abnorme Strahlungsverhältnisse, wie sie hier künstlich erzeugt worden waren, dürften sonst kaum vorkommen, außer vielleicht durch Sonnenbestrahlung. Gegen diese muß das Instrument wie alle übrigen geschützt werden.

Wie schon zu erwarten war, gaben möglichst eng gewickelte Spiralen (ca. 4 mm Windungsdurchmesser) die besten und gleichmäßigsten Resultate; es wurden deshalb nur noch solche verwendet.

Ein Uebelstand, der bei länger anhaltender großer Feuchtigkeit, wie bei den letztgenannten Versuchen, auftrat, war Schimmelbildung, auch an den Films selbst. Eine Wirkung der Schimmelbildung auf die Zeigerstellung habe ich, in den Anfangsstadien wenigstens, nicht bemerken können. Abgesehen von der Gefahr der Zerstörung der Gelatineschicht, sind diese Wucherungen auch wegen ihrer Hygroskopie unangenehm. Ich verringerte sie durch Paraffinieren aller übrigen organischen Teile, wie Papierskalen und Korke, und bekämpfte sie ferner wirksam durch Chloroform, das ich im Versuchsraume verdampfen ließ. Die Chloroformdämpfe übten, soweit sich erkennen ließ, keine schädlichen Wirkungen auf die Films aus. Leider lösten sie, wenn sie sich niederschlugen, den Kitt und gefährdeten so die Dichtigkeit. Die Konservierung mit Salizylsäure[12]) (siehe auch S. 9) würde sicher wirksam sein; indessen bleiben die Re-

[12]) Fortschr. d. Chem. Herausg. v. G. Bodländer, Braunschweig. Fr. Vieweg u. Sohn, 1880, S. 1341.

sultate meiner Untersuchungen auch so hinreichend sicher.

3. Eichung.

a) Grenze des Meßbereichs.

Nach den geschilderten Versuchen konnte ich nun daran gehen, das Instrument zu eichen, d. h. es von den niedrigsten bis zu den höchsten Feuchtigkeitsgraden mit dem Koppeschen Haarhygrometer zu vergleichen.

Zunächst ging ich von höheren Feuchtigkeitsgraden nahe dem Sättigungspunkte, öfters auch von der gewöhnlichen Zimmerfeuchtigkeit (40—50 %), zu geringerer über. Schon bei der ersten Vergleichsreihe fiel mir auf, daß die Zeiger einiger Spiralen etwa bei 36 % Feuchtigkeit stehen blieben. Da lag nun die Annahme nahe, daß das Filmhygrometer ähnlich wie das Haarhygrometer (nach Saussure[13]), Kleinschmidt[14]) u. a.) eine untere Grenze seines Meßbereichs habe, unterhalb deren keine oder nur sehr unzuverlässige Angaben zu erhalten sind. Und in der Tat bestätigte sich dies in überraschender Weise. Die Versuche wurden mit größerer Sorgfältigkeit, z. T. mit besserem Material wiederholt, und jedesmal blieben die Zeiger nach Erreichen ungefähr desselben Trockenheitsgrades stehen, ja sie kehrten meistens sogar ein Stück um, zumal wenn die Feuchtigkeit sehr schnell abgenommen hatte.

Daß die Erscheinung keine zufällige, etwa infolge der Herstellungsweise einem einzelnen Hygrometer individuell anhaftende Eigenschaft war, geht daraus hervor, daß von 8 zugleich untersuchten Spiralen, 2 weißen und 6 schwarzen, nur eine diese Eigenschaft nicht deutlich zeigte. Bei ihr lag vermutlich die Grenze zufällig etwas tiefer, wie sie bei anderen auch manchmal höher gefunden wurde. Tabelle I und Kurve 1 lassen übrigens auch auf eine etwas niedriger liegende Grenze bei der betreffenden Spirale schließen. Die

[13]) Versuche über die Hygrometrie, 1. Heft, Ostwalds Klassiker der exakten Wissensch. Leipzig 1900, S. 105.

[14]) Beiträge z. Phys. d. freien Atmosph. 2, 1906—08, S. 99 ff.

Spiralen waren von verschiedener Breite und Länge des verwendeten Filmstreifens, mit engeren und weiteren Windungen. Während gewöhnlich 5 und mehr Teilstriche auf 1 % Feuchtigkeit entfielen, wurden zwischen 36 und 33 % die Ausschläge sehr klein, weiter unterhalb sogar negativ. Tabelle VIIIa und b geben die Erscheinung sehr deutlich wieder.

Bei dem Filmstreifenhygrometer (siehe S. 19), das ebenfalls diesen Versuchen mit unterworfen wurde, zeigte sich die Erscheinung wegen der viel geringeren Empfindlichkeit weniger scharf, wurde aber doch auch in mehreren Fällen festgestellt. Da hierbei kein schichtloses Spiralenhygrometer mit untersucht wurde, konnte nicht mit Sicherheit geschlossen werden, ob die Gelatine oder das Celluloid, oder auch beide daran beteiligt seien. Wenn nur das Celluloid der Träger der Erscheinung wäre, so würde die Gelatineschicht allein noch einen genügend großen Ausschlag ergeben, so daß also der Zeiger nicht stehen bleiben würde. Da dieser nun meist sogar etwas umkehrt, so kann man eher annehmen, daß das Gegenteil der Fall ist, daß also die Gelatineschicht von diesem Punkte an kein Wasser mehr abgibt, wohl aber noch die außenliegende Celluloidunterlage, wenn auch in geringerem Maße. Nach ihr hin müßten sich also bei noch weiter abnehmender Feuchtigkeit die Windungen krümmen, weil sie hier gewissermaßen als die stärker hygroskopische Schicht betrachtet werden kann. Die Beobachtungen am Filmstreifenhygrometer machen es freilich wahrscheinlich, daß auch die Celluloidschicht ihre Austrocknungsgrenze hat, vermutlich aber eine tiefere. Damit ließe sich das geringe Umkehren der Zeiger gut vereinbaren.

Die Films erholen sich erst bei höherer Feuchtigkeit nach einiger Zeit von dieser gewaltsamen Austrocknung, wie ja auch das Haarhygrometer[15]).

[15]) Wolpert, l. c., S. 305.

b) Trägheit.

Nach dieser Feststellung einer unteren Grenze der Verwendbarkeit wurden nun die Instrumente bei höheren Feuchtigkeitsgraden mit dem Haarhygrometer verglichen, indem mit verschiedener Geschwindigkeit einmal feuchtere, dann wieder trockenere Luft durch den Versuchsraum hindurchgeleitet wurde. Damit gewann ich zugleich einen Anhalt für die Trägheit der Filmhygrometer. Es zeigte sich nämlich, wenn man beispielsweise zuerst zu größerer Trockenheit und daran anschließend wieder zu höherer Feuchtigkeit überging, daß die Spiralhygrometer meist schneller auf die Umkehr reagierten, als das Haarhygrometer. Dieses zeigte sie später an, als sie in Wirklichkeit stattfand, denn durch das Umdrehen der Hähne, die nach dem Sättigungsapparat und dem Trockenrohr führten, konnte ich die Umkehr willkürlich vor sich gehen lassen und ihr Eintreten genau feststellen. Die Films sind also hier weniger träge als das Haarhygrometer. Dagegen bei einer Umkehr im entgegengesetzten Sinne, d. h. bei zuerst ansteigender und dann wieder abnehmender Feuchtigkeit kehrten die Filmhygrometer nicht vorher um, folgten aber ungefähr ebenso schnell als das Haarhygrometer. Sowohl die untere als die obere Umkehr konnte bei den verschiedensten Feuchtigkeitsgraden stattfinden. Stets zeigte sich bei niedriger Feuchtigkeit geringe, bei hoher größere Trägheit, sowohl absolut, als auch relativ zum Haarhygrometer, das ja gerade eine im entgegengesetzten Sinne zunehmende Trägheit besitzt[16]).

Bei mehreren nicht ganz gleich empfindlichen Spiralen stieg die Trägheit ziemlich rasch an, bei der schon mehrfach erwähnten besonders gut funktionierenden (A in Tabelle II—VII, Nr. 8 in Tabelle VIII a und b) war eine erhebliche Zunahme der Trägheit

[16]) Kleinschmidt, l. c. und Pircher, Ueber Haarhygrometer, Denkschr. d. K. Akad. d. Wiss., Bd. 73, Wien 1901, S. 297.

etwa von 80 % aufwärts festzustellen. Die Einstellung auf den Sättigungspunkt geschah deshalb auch stets erst nach einiger Zeit, weshalb man hier mit der Ablesung immer etwas warten mußte. Die endgültige Zeigerstellung bei vollständiger Sättigung war stets die gleiche. Das ist auch bereits gelegentlich der Bestrahlungsversuche festgestellt (siehe S. 23 und Tabelle III—VII).

In Kurve 18 ist die Umkehr v o r dem Haarhygrometer graphisch dargestellt. Kurve 19 und 20 geben den Verlauf über ein größeres Intervall wieder, und zwar bei langsamerem Luftstrom. Hier ist zwar kein Voreilen vor dem Haarhygrometer, wohl aber ein bedeutend schnelleres Folgen nach der Umkehr zu erkennen. Wir haben hier Kurven vor uns, die symmetrisch zu einer Mittellinie liegen, die den Verlauf bei ganz langsam sich verändernder Feuchtigkeit darstellen würde. Je schneller dies aber geschieht, desto weiter entfernen sich die Kurvenzweige von der Geraden, wie in Kurve 20 a. Die Punkte in 21 a sind teils vor, teils nach denen von 20 a, aber bei langsamerer Veränderung der Feuchtigkeit bestimmt, und zwar während zweier Tage. Hier zeigt sich der Unterschied ganz auffallend. Fig. 20 zeigt in ihrem oberen Teile auch den Vorgang der oberen Umkehr. Sie geschieht hier entgegengesetzt zu der am unteren Ende, ein Zeichen dafür, daß oben die Trägheit größer ist, als die des Haarhygrometers. Der Punkt, wo die Kurvenzweige sich schneiden, ist ungefähr der, wo die Trägheiten gleich sind; unterhalb ist die des Haarhygrometers, oberhalb die des Filmhygrometers größer. Der Punkt liegt in der Tat nahe bei 80 % (siehe oben). Deshalb ist auch der untere Teil der Kurve 20 kleiner, weil wir uns in der Nähe dieses Punktes befinden. Daß bei hoher Feuchtigkeit (94 %) auch die untere Umkehr im anderen Sinne als bei geringer stattfindet, zeigt deutlich Kurve 18 a. Dagegen bei den Bestrah-

lungsversuchen, wo ja die Films in Wirklichkeit niedrige relative Feuchtigkeitsgrade zeigen, geschieht sie im gleichen Sinne (Kurve 6). Die Aehnlichkeit von Kurve 6 mit dem unteren Ende von 19 ist sehr auffallend. Auch 8—14 zeigen ganz analoge Gestalt, bei einigen ist die Umkehr entgegengesetzt, davon gehören 10 und 13 derselben Spirale (B) an; bei ihr ist also unten die Trägheit schon groß. Nr. 6, 9 und 12 stimmen unter sich ebenfalls überein (A), dagegen 11 nicht mit 8 und 14 (D). Hier liegen aber überhaupt die Kurvenzweige nahe beieinander. Für Instrumente, die schon bei niedrigen Feuchtigkeitsgraden größere Trägheit besitzen, erfolgt daher auch die Umkehr im gleichen Sinne wie die obere (Kurve 19 a).

Für gewöhnlich, d. h. bei langsam sich ändernder Feuchtigkeit, kann man aber die gerade Linie als Eichkurve des Filmhygrometers annehmen, Fig. 21 u. 21 a; für niedrigere Feuchtigkeitsgrade bis zu etwa 33 % herab ist dies ja bereits in Kurve 1 gezeigt.

Wir haben hier Proportionalität der Ausschläge mit der relativen Feuchtigkeit, sind also berechtigt, dem Filmhygrometer eine gleichgeteilte Prozentskala zu geben, während für das Haarhygrometer eine solche nicht gilt.

Da auf je 1 % des Haarhygrometers 5 Teilstriche (Bogengrade) des Filmhygrometers kommen, wovon Halbe noch bequem mit bloßem Auge geschätzt werden können, so ergab sich eine große Genauigkeit, 5 mal so groß als sie z. B. Adolf Fr. Weber mit einem 8fach vergrößernden Mikroskop erhalten hat.[17]) Für den Meßbereich von 33—100 % reichte also die Kreisskala gerade aus. Das Filmhygrometer wäre somit dem Haarhygrometer weit überlegen, wenn es nicht die mit wachsender Feuchtigkeit zunehmende Trägheit besäße.

[17]) Adolf Fr. Weber, l. c., S. 32.

Eine Erklärung dieser unangenehmen Erscheinung könnte einerseits darin zu suchen sein, daß die Gelatine nahe dem Sättigungspunkte immer langsamer Wasserdampf aufnimmt oder solchen abgibt, andererseits auch darin, daß die Gelatineschicht mit zunehmender Feuchtigkeit weicher und weicher wird und so der Elastizität des Celluloids immer weniger Widerstand zu leisten vermag.

Im Anschluß daran ergibt sich nun die Frage, ob diese Filmhygrometer auch Uebersättigungen anzeigen, wie es das von Adolf Fr. Weber[15]) benutzte achsenlose Haarhygrometer tut. Der Achsenlosigkeit steht freilich hier die große Trägheit nahe dem Sättigungspunkte entgegen. Um darüber Aufschluß zu verschaffen, war deshalb eine Reihe von Versuchen nötig, die im nächsten Abschnitt behandelt werden sollen.

4. Entspannungsversuche.

a) Versuchsanordnung und -Vorbereitung.

Als Versuchsraum diente dasselbe zylindrische Glasgefäß, wie für die vorangegangenen Versuche (s. S. 16 u. Fig. 2). Die Deckplatte konnte infolge ihres relativ geringen Durchmessers und ihrer Dicke große Drucke aushalten. Der Zylindermantel hielt schon wegen seiner starken Krümmung auch bei geringerer Wandstärke die gleiche Beanspruchung aus. Ich unterwarf das geschlossene und abgedichtete Gefäß zuvor im leeren Zustande probeweise einem plötzlichen Unterdruck bis zu etwa 20 cm Quecksilber. Es vertrug dieses gut, nur an den ausgedehnten Kittstellen, namentlich da, wo die obere Deckplatte auf den Rand des Zylinders gekittet war, zeigten sich nach mehrmaligem Entspannen geringe Undichtigkeiten, die immer wieder durch Erhitzen des Kittes beseitigt werden mußten. Ich ging daher bei den Versuchen nie über 12 cm Unterdruck hinaus, um Störungen durch

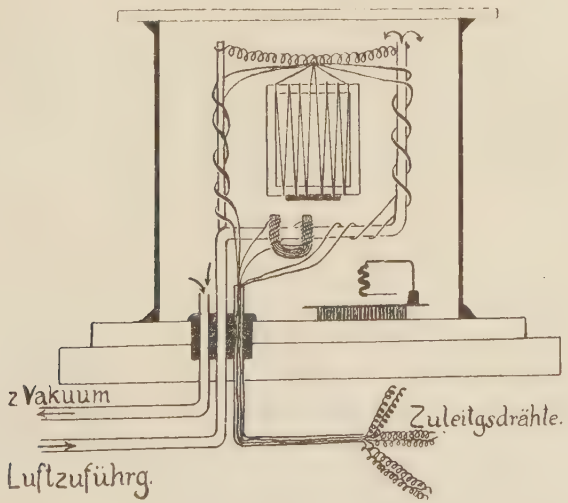
[15]) l. c., S. 29.

plötzlich aufgetretene Undichtigkeiten möglichst zu vermeiden.

Die Entspannungsvorrichtung[19]) bestand aus vier großen Glasballons, die möglichst hoch evakuiert wurden und durch weite Glasrohre und einen weitgebohrten Hahn mit dem Versuchsraum in Verbindung standen. Außerdem hatte ich für die übrigen Versuche noch eine direkte Verbindung des Versuchsraumes mit der Luftpumpe. Der Betrag der Entspannung wurde an einem besonderen Manometer abgelesen.

Das Bolometer zur Messung der Temperatur[20]) hängte ich direkt an die zur Einleitung der Luft dienende knieförmig gebogene Glasröhre, auf die noch ein Glasstab aufgesetzt war (Fig. 2). Auch den Elektromagneten für die Bewegung des Bolometerrähmchens befestigte ich an dem wagerechten Teil dieser Röhre. Die Eichkurve des Bolometers stellt Kurve 22 dar.

Fig. 2.



Vertikalschnitt durch den Versuchsraum.

[19]) Siehe auch Ad. Fr. Weber, l. c. Fig. 1 und S. 20—23.
[20]) Ad. Fr. Weber, l. c. Fig. 2 und S. 24—28.

Der Zylinderraum wurde mit möglichst gesättigter, staubfreier Luft gefüllt und dann plötzlich um 12 cm Quecksilber durch kurzes Oeffnen des obengenannten Hahnes entspannt.[21])

Die Ablesung der Zeigerstellung geschah wieder mit bloßem Auge; da aber diese Versuche in eine sehr dunkle Zeit, November und Anfang Dezember, fielen, beleuchtete ich die Skala schräg von oben durch eine elektrische Glühlampe, vor die ein Wasserkasten zur Absorption von dunklen Wärmestrahlen gesetzt war.

b) Die Versuche und ihre Ergebnisse.

Adolf Fr. Weber hat mit seinem Haarhygrometer Uebersättigungen bis zu 107% gemessen, bei Entspannungen um 10—12 cm Quecksilberdruck.[22]) Ich entspannte stets um 12 cm, um eine möglichst intensive Wirkung zu erreichen. Es wurden sieben Versuche angestellt, die sämtlich ganz gleich verliefen, sodaß ich nur einen davon kurz zu beschreiben brauche. Einigemale brach ich den Versuch deshalb auch nach kurzer Zeit ab.

Da ich bei sehr niedriger Zimmertemperatur, etwa 12° C., die Versuche anstellte, gelang es mir, durch die Entspannung sehr starke Abkühlung (bis zu etwa + 1° C.) und damit hohe Uebersättigungen zu erreichen. Es ergab sich z. B. für Versuch 7 nach der Formel[23])

$$R\nu = 100 \cdot \frac{e_{\vartheta_0} R_0}{E\vartheta\nu},$$

im Maximum eine berechnete relative Feuchtigkeit von 176 %. Tatsächlich aber zeigte das benutzte Filmhygrometer stets nur einen Ausschlag von ½ Teilstrich, was einer Vermehrung der Feuchtigkeit um 0,1 Prozent entsprechen würde. Dieser geringe Ausschlag kann auch auf vorher nicht ganz vollständige Sättigung

[21]) Ad. Fr. Weber, l. c. S. 19 u. 32—35.

[22]) Ad. Fr. Weber, l. c., Tab. I—X. Ref. v. A. Wegener. Naturw. Rdsch., Jul. Springer, Berlin 1912, Nr. 44, u. Meteorol. Ztschr. 1913, H. 1, S. 41.

[23]) Vgl. Ad. Fr. Weber, l. c. S. 35.

zurückzuführen sein. Danach schlug der Zeiger gewöhnlich um ebensoviel nach der anderen Seite aus und ging schließlich allmählich in die Anfangsstellung zurück.

Diese Ausschläge sind, obgleich sie stets deutlich beobachtet wurden, zu gering, um daraus irgendwelche Schlüsse ziehen zu können.

Wir sehen also, daß diese Instrumente, die ja innerhalb eines weiten Spielraumes sehr empfindlich sind, oberhalb 100 % relativer Feuchtigkeit keine brauchbaren Ablesungen gestatten, wie ja auch schon unterhalb 100 % sich die Trägheit unangenehm bemerkbar macht. Auch die Uebersättigung bei plötzlich eintretendem Nebel, wie sie A. Wagner[24]), A. Wegener[25]) u. a. beobachtet haben, wird man mit dem Filmspiralenhygrometer nicht messen können.

F. Zusammenfassung.

Es ist im Vorstehenden gezeigt worden, daß in geeigneter Weise hergestellte Filmspiralenhygrometer recht brauchbar zur Feuchtigkeitsmessung sind. Wohl reagieren sie, und zwar in gesetzmäßiger Weise, auf starke Wärmestrahlung; unter gewöhnlichen Umständen jedoch werden sie davon im Verhältnis zu ihrer sonstigen Empfindlichkeit kaum merklich beeinflußt. Ein Nachteil, der aber nicht besonders ins Gewicht fällt, ist die bei etwa 33 % Feuchtigkeit festgestellte untere Grenze des Meßbereichs; schwerwiegender ist dagegen die bei höheren Feuchtigkeitsgraden wachsende Trägheit, die ein Verfolgen schnell vor sich gehender Veränderungen erschwert und auch die Messung von Uebersättigungen ausschließt.

Infolge seiner Kleinheit ist das Instrument außerordentlich geeignet zur Feuchtigkeitsmessung an Stel-

[24]) A. Wagner, Untersuchungen der Wolkenelemente auf dem hohen Sonnblick. Wiener Sitz. Ber., Bd. 177, IIa. Dez. 1908.

[25]) A. Wegener, Meteorol. Terminbeobachtg. a. Danmarks-Havn. Kopenhagen 1911.

len, die für jedes andere Hygrometer unzugänglich sind.[26]) Auch kann man mehrere davon in einem größeren Raume verteilen, etwa um eine mögliche schichtweise Verschiedenheit in der Feuchtigkeit[27]) festzustellen.

Für die Messung von Feuchtigkeitsgraden, wie sie gewöhnlich im Freien oder im Zimmer herrschen, ist man wohl berechtigt, das Filmspiralenhygrometer als dem Haarhygrometer überlegen anzusehen.

Die Frage nach der Lebensdauer kann dahin beantwortet werden, daß nach meinen Beobachtungen, die sich bei einzelnen Instrumenten über ein halbes Jahr hin erstreckten, die Filmhygrometer sich in ihrer Empfindlichkeit nicht verändern. Für den praktischen Gebrauch ist nur dafür Sorge zu tragen, daß sie gegen Staub und Zersetzung geschützt sind.

---

[26]) Siehe z. B. W. Escher. Inaug.-Diss., Marburg 1912, S. 22.
[27]) Adolf Fr. Weber, l. c., S. 40.

Tabelle I.

Vorversuche.

(Hierzu Kurve Nr. 1.)

Zeit in Min.	Haar-hygr.	Film-hygr.	Zeit in Min.	Haar-hygr.	Film-hygr.	Zeit in Min.	Haar-hygr.	Film-hygr.
1	28	118	18	32,8	109,4	35	37,8	100,7
2	28	116	19	32,9	109,0	36	38,3	100
3	28	115,5	20	33	108,5	37	38,8	99,3
4	29	115	21	33,2	108,3	38	39,5	98,8
5	29,5	114	22	33,3	108,0	39	40	98,4
6	29,9	113,5	23	33,4	108	40	40,7	98
7	30,1	113	24	33,8	106,9	41	41,7	97,7
8	30,2	113	25	34,5	106	42	42,2	97
9	30,2	112,7	26	35	106	43	42,4	96,9
10	30,5	112,4	27	35,2	105,8	44	42,8	96,8
11	—	—	28	35,3	105,5	45	43,2	96,7
11	31,5	112	29	35,7	105	46	44	96,7
13	31,7	111,5	30	36	104,2	47	44,8	96,7
14	31,9	111	31	36,8	103,9	48	46,5	96,7
15	32,2	110,5	32	37	103,8	49	47,2	96,4
16	32,4	110	33	37,2	102	50	48	96
17	32,6	109,9	34	37,5	101,3			

Anmerkung: Wenn die Zahlenwerte beim Filmhygrometer, auch in den folgenden Tabellen, bei wachsender Feuchtigkeit abnehmen und umgekehrt, so liegt das daran, daß die betreffende Spirale, von oben gesehen, im Sinne des Uhrzeigers gewickelt ist, ebenso wie die Skala läuft, und daß sie sich dann bei zunehmender Feuchtigkeit im entgegengesetzten Sinne aufrollt. Das ist für das Wesen der Erscheinung natürlich belanglos.

Tabellen zu den **Bestrahlungsversuchen** Nr. II—VII.

Tabelle II.

1 Lampe in 20 cm Entfernung,
Haarhygrometer konstant bei 100 %.

Temp. in °C	Zeit in Min.	Spir. A.	Spir. B.	Spir. C.	Spir. D.	Spir. E.
		stellte sich ein auf Teilstrich				
19,0	0	0	158	360	145	17
5	3	5	160	360	142	17
20,0	5	10	152	358	142	17
5	7	15	149	355	138	17
21,0	10	20	144	352	135	17
5	13	25	142	350	135	18
22,0	17	25	132	347	135	18
5	21	25	(132)	345	135	18
23,0	26	25	(132)	343	—	18
		Kurve Nr. 2	Kurve Nr. 3	Kurve Nr. 4	Kurve Nr. 5	

Anmerkung: A und B sind hier und in den folgenden Tabellen „schwarze", durch Silberausscheidung in der Gelatineschicht geschwärzte, C und D „weiße" Spiralen, also ohne Silberausscheidung, E endlich ist ohne Gelatineschicht hergestellt.

Tabelle III.

1 Lampe in 20 cm Entfernung,
Haarhygrometer fiel von 100 auf 99 %.

Temp. in °C	Zeit in Min.	Spir. A.	Spir. B.	Spir. D.	Spir. E.	
		eingestellt auf Skalenteil				
18,6	0	330	165	155	175	
19,3	3	338	165	155	173	
20,0	6	345	166	150	169	
20,6	8	350	166	148	167	
21,0	10	355	165	140	167	**während** der
21,5	12	5	165	135	168	Bestrahlung
22,2	14	10	165	128	168	
22,6	18	10	163	122	168	
23,2	18	20	162	110	168	
23,5	21	20	161	100	168	
24,0	25	23	160	90	168	
24,5	29	25	158	80	168	
25,0	35	25	155	70	168	
25.5	40	25	150	60	168	
26,0	48	25	148	60	167	
26,5	58	25	144	65	167	
26,0	63	355	145	90	167	
25,0	68	345	?	120	169	
24,0	73	338	?	130	170	**nach** der
23,2	78	335	?	140	172	Bestrahlung
		Kurve Nr. 6 u. 6a	Kurve Nr. 7	Kurve Nr. 8 u. 8a		

Tabelle IV.

2 Lampen in 20 cm Entfernung,
Haarhygrometer fiel anfangs auf 95 %.

Temp. in °C.	Zeit in Min.	Spir. A.	Spir. B.	Spir. D.	Spir. E.	
		eingestellt auf Skalenteil				
18,4	0	325	160	160	175	
19,0	2	325	159	160	175	
5	4	330	158	155	173	**während** der
20,0	6	335	155	160	170	Bestrahlung
8	8	340	155	160	170	
21,5	10	345	155	155	168	
22,2	12	0	155	150	168	
23,0	15	23	152	145	168	
6	17	40	152	135	170	
24,2	20	55	150	130	170	
5	22	68	147	126	170	
25,1	26	90	145	112	171	
5	29	105	145	105	171	
26,0	34	115	140	90	171	
26,5	41	120	133	80	171	
0	45	60	135	85	171	
25,5	47	45	135	93	173	
0	49	30	135	100	174	
24,5	?	?	135	?	174	
0	54	5	135	115	174	
23,5	56	0	137	117	?	
0	59	345	137	125	175	**nach** der
22,5	63	350	138	130	175	Bestrahlung
0	65	345	138	136	175	
21,5	71	338	138	136	175	
0	78	335	142	143	175	
20,5	86	330	142	150	175	
4	94	330	145	153	175	
0	112	330	147	156	175	
19,7	128	330	147	158	175	
		Kurve 9	Kurve 10	Kurve 11		

Tabelle V.

3 Lampen in 70 cm Entfernung,
Haarhygrometer fiel von 100 auf 98 %.

Temp. in °C	Zeit in Min.	Spir. A.	Spir. B.	Spir. D.	Spir. E.	
		eingestellt auf Skalenteil				
17,0	0	325	153	160	176	
5	3	325	153	165	175	
18,0	6	325	153	165	175	
5	8	330	152	163	174	
19,0	11	330	152	160	173	
5	15	333	152	158	173	**während** der
20,0	18	338	151	157	173	Bestrahlung
5	23	342	150	152	173	
21,0	29	355	150	150	173	
5	37	7	147	145	173	
22,0	48	15	147	138	174	
5	65	18	143	130	174	
23,0	89	18	140	120	174	
5	98	20	137	117	174	
24,0	109	23	133	115	174	
5	131	23	127	115	174	
0	137	350	132	130	176	
23,5	140	342	132	135	176	
0	164	330	132	140	177	**nach** der
22,5	148	330	132	142	177	Bestrahlung
0	152	330	132	147	177	
21,4	160	330	135	148	178	
0	165	330	135	154	178	
20,5	178	328	139	157	178	
2	195	328	140	160	178	
2	245	328	143	163	178	
		Kurve Nr. 12	Kurve Nr. 13	Kurve Nr. 14		

Tabelle VIa.

1 Lampe aus 75 cm Entfernung,

Haarhygrometer konstant bei 100 %.

Temp. in °C.	Zeit in Min.	Spir. A.	Spir. B.	Spir. D.	Spir. E.
21,2	0	320	135	166	183
6	9	320	135	166	183
22,0	18	328	135	166	183
4	33	330	134	165	183
6	38	330	133	164	183
		Kurve 15			

Tabelle VIb (wie oben).

20,0	0	310	141	175	184
5	8	318	140	175	184
21.4	30	320	140	175	184
22,1	64	325	142	175	184
6	95	328	142	170	184
8	105	328	142	170	184
23,1	136	330	142	167	184
3	146	330	142	167	184
		Kurve 16			

Tabelle VII.

1 Lampe aus 120 cm Entfernung.

22,5	0	313	140	175	187
8	18	315	139	175	187
23,2	34	315	139	175	187
5	62	318	138	174	187
		Kurve 17			

Tabellen für den **Nachweis einer unteren Grenze des Messbereichs.**

Tabelle VIIIa. 1. Beispiel.

Haar-hygrom.	Ablesungen am Filmspiralenhygrometer Nr.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
64%	215	203	113	270	20	198	343	303
62	200	237	80	265	20	202	335	317
58	147	298	45	248	10	210	325	343
56½	141	310	20	230	10	210	323	355
54	125	332	20	228	10	210	322	3
53	112	353	348	202	3	220	320	43
48	75	22	330	195	2	225	310	58
:	:	:	:	:	:	:	:	:
36	45	71	295	160	360	240	308	97
33	42	68	300	160	358	240	307	98
23	115	262	35	245	30	249	320	43

Tabelle VIIIb. 2. Beispiel.

47%	140	100	50	240	12	195	295	330
46½	142?	98?	33	235	10	198	290	342
43	128	114	28	230	8	202	290	350
41	120	125	20	228	5	205	285	358
36½	115	132	0	200	3	212	280	12
33½	115	125	10	205	8	215	280	10
32½	123	115	15	218	10	218	280	10

Anmerkungen: Die wagerecht punktierte Linie deutet die Grenze an. Spirale 3 und 5 sind ohne, alle übrigen mit Silberausscheidung. Nr. 8 ist identisch mit Spir. A in Tab. II–VII. Infolge von Verschiebungen und Neujustierungen der Skalen stimmen die entsprechenden Werte in den beiden Tabellen nicht bei jeder Spirale überein.

Vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Marburg ausgeführt. Es sei mir gestattet, an dieser Stelle dem Direktor des Institutes,

Herrn Prof. Dr. F. Richarz

für die Anregung zu der Arbeit und das mir stets entgegengebrachte, fördernde Interesse meinen Dank auszudrücken.

Ebenso danke ich Herrn **Dr. Th. Körner** dafür, daß er mir seine Erfahrung auf diesem Gebiete und einschlägige Literatur zur Verfügung stellte.

Endlich bin ich auch Herrn **Dr. K. Stuchtey** zu Danke verpflichtet für die freundlichen Ratschläge während der Versuche und bei Abfassung dieser Schrift.

Lebenslauf.

Am 1. Juli wurde ich, Walter Carl Louis Oehmichen in Gera (Reuß) als Sohn des kgl. preuß. Lokomotivführers Gustav Oehmichen geboren. Ich bin evang.-lutherischen Bekenntnisses und Staatsangehöriger des Fürstentums Reuß j. L.

Von Ostern 1895 bis 98 besuchte ich die 1. Bürgerschule zu Gera und trat dann in die Sexta des städt. Realgymnasiums daselbst ein, das ich Ostern 1907 mit dem Reifezeugnis verließ.

Ich widmete mich nun an der Universität Leipzig dem Studium der Mathematik und besonders der Naturwissenschaften; von Ostern 1910 ab setzte ich dieses an der Universität Marburg fort.

Meine akademischen Lehrer waren

in Leipzig: Chun, Credner, Des Condres, Hantzsch, Hausdorff, M. Heinze, Kaestner, K. Neumann, Pfeffer, Rinne, Rohn, Sudhoff, Wagner, Wiener, Woltereck, Wundt, Zirkel;

in Marburg: Bauer, Diels, Feußner, Geldner, Jensen, Kayser, Mirbt, Rade, Richarz, Schulze, Take, Zincke.

Das Examen Rigorosum bestand ich am 11. Juni 1913. In der folgenden Zeit bereitete ich mich in Marburg auf das Staatsexamen vor.

Kurventafel.

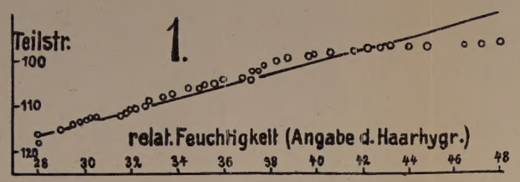
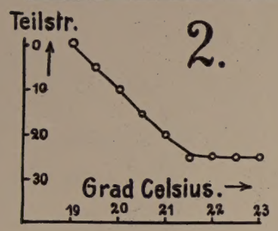
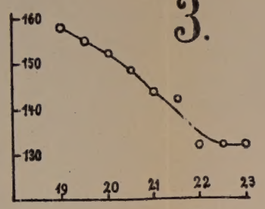
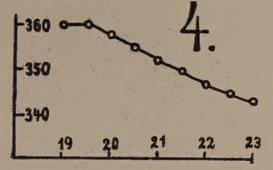
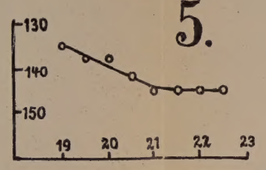
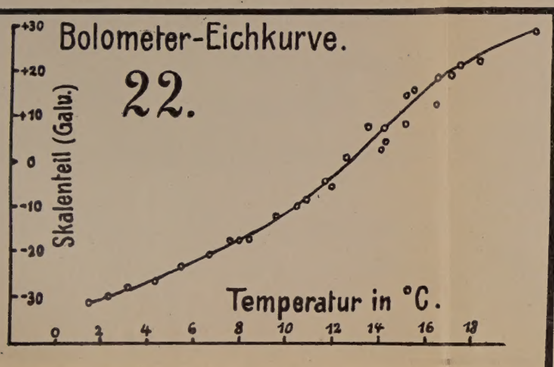
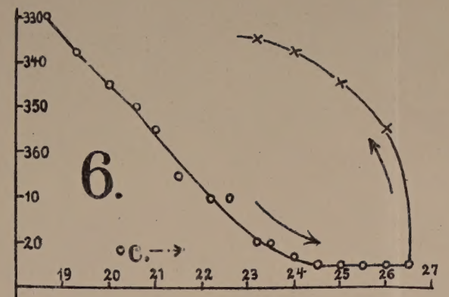
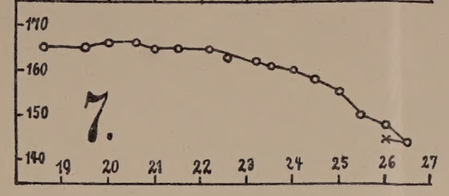
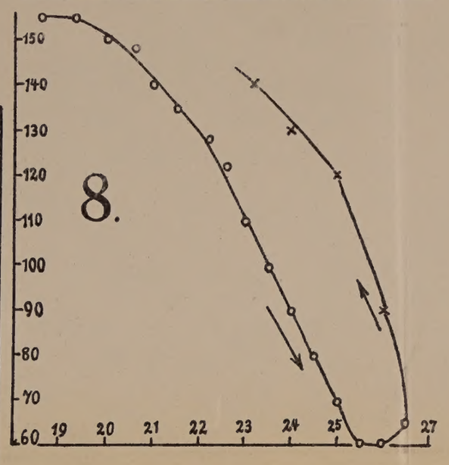
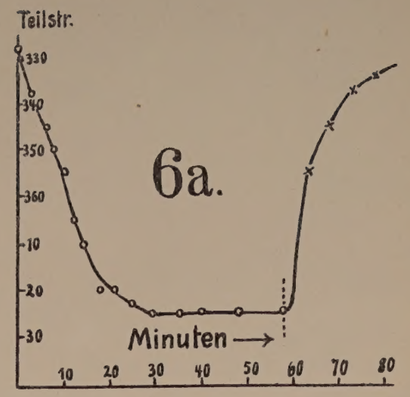
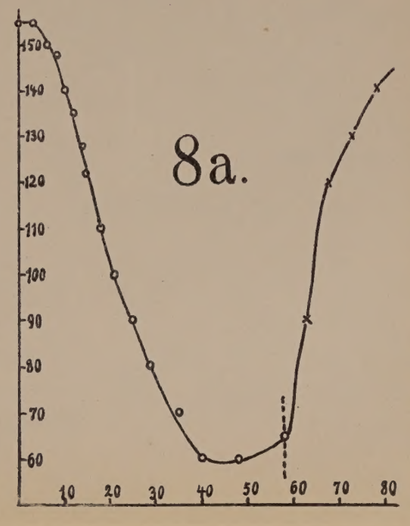
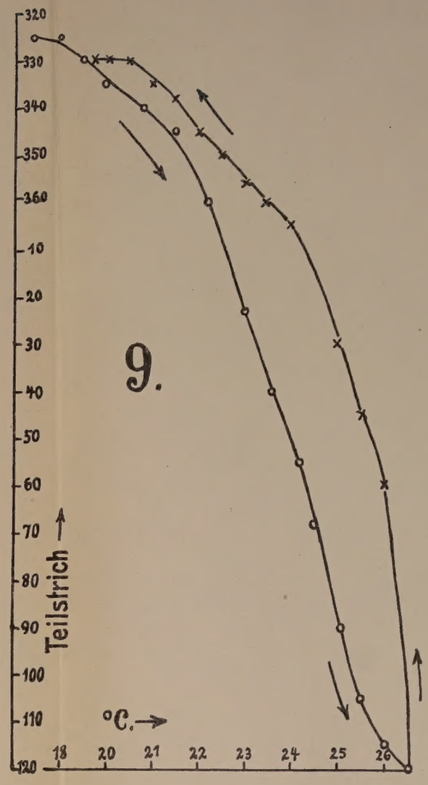
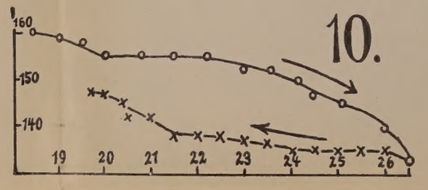
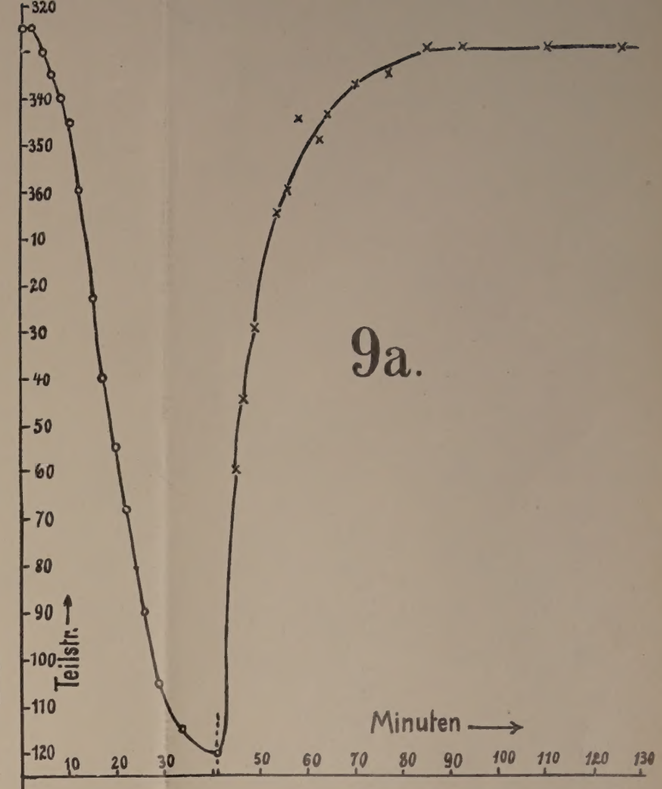
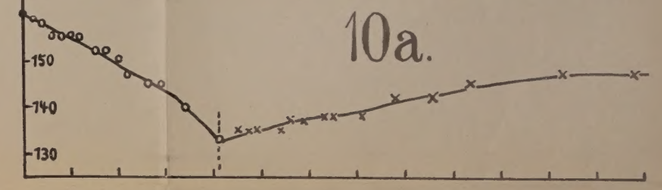
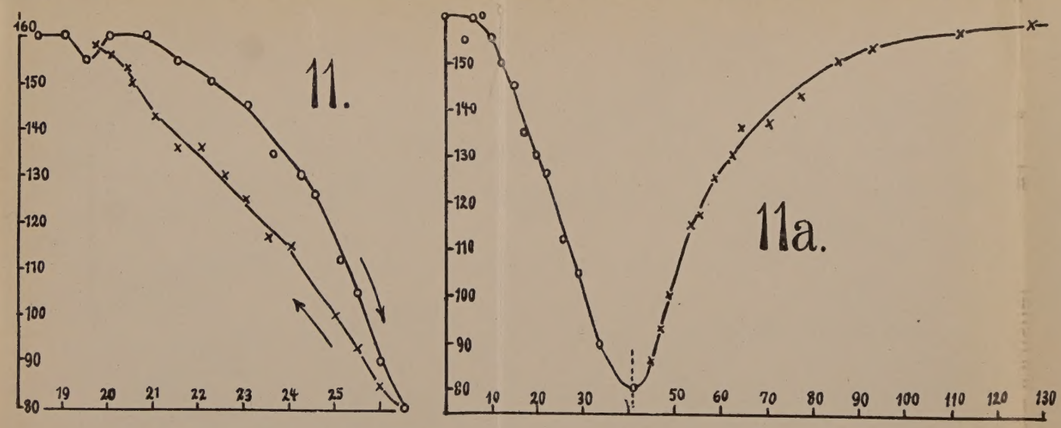
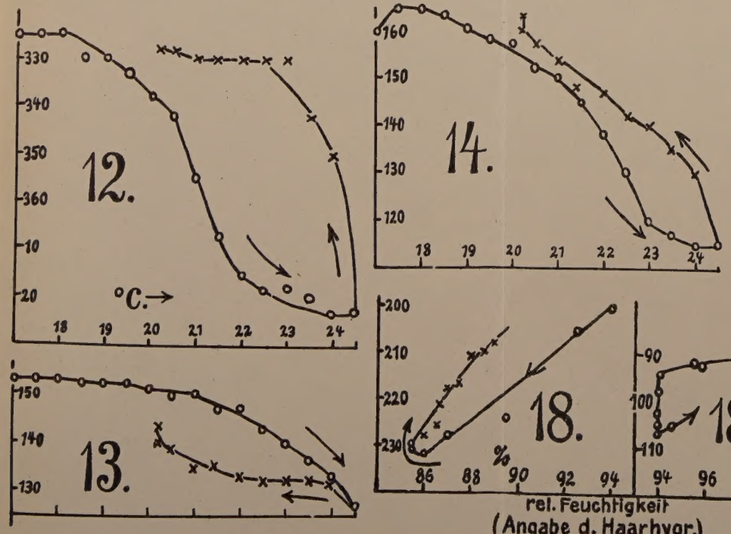
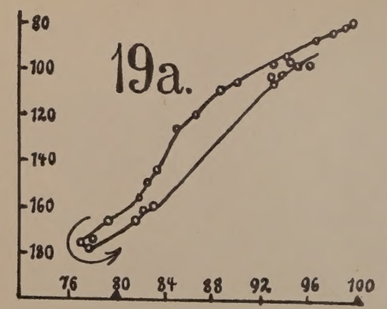
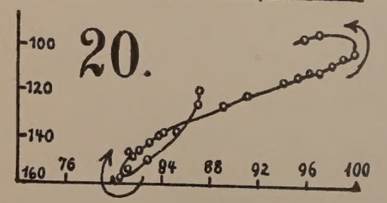
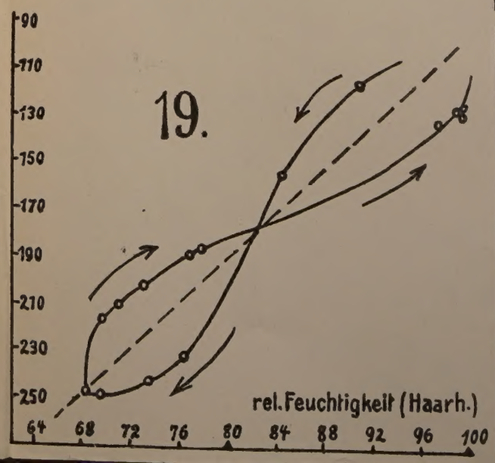
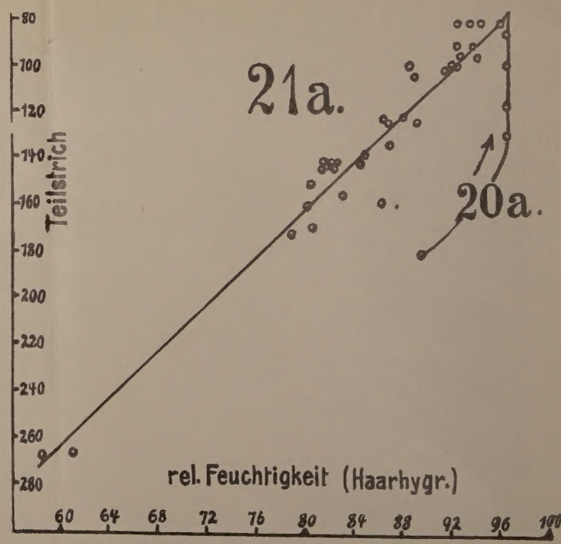
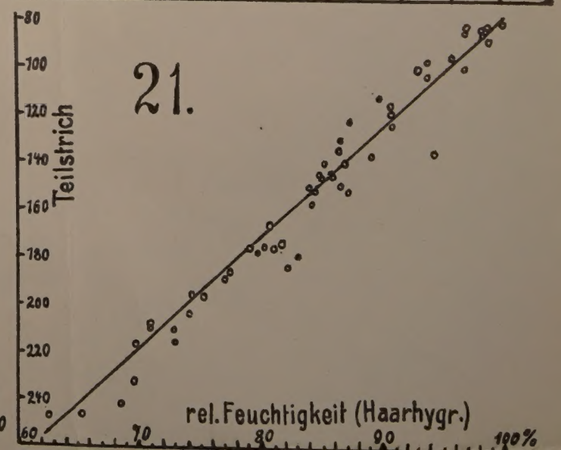
Kurve Nr. 1 zu den Vorversuchen.

Nr. 6-17 zu den Bestrahlungsversuchen.

Nr. 6a-11a nach dem zeitlichen Verlauf.

—o—o— **während** } der Bestrahlung.
—x—x— **nach** }

Nr. 18-20a Trägheitskurven.

Nr. 21 u. 21a Eichkurven.

Nr. 22 Bolometer-Eichkurve.